

超高強度材料を用いたRCはりのせん断耐力算方式

著者	王 衛 侖
号	3239
発行年	2003
URL	http://hdl.handle.net/10097/8511

氏 名	わん ういー ろん
授 与 学 位	王 衛 命
学位授与年月日	博士 (工学)
学位授与の根拠法規	平成 16 年 3 月 25 日
研究科, 専攻の名称	学位規則第 4 条第 1 項
学 位 論 文 題 目	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 土木工学専攻
指 導 教 官	超高強度材料を用いた RC はりのせん断耐力算定式
論文審査委員	東北大学教授 鈴木 基行
	主査 東北大学教授 鈴木 基行 東北大学教授 三浦 尚
	東北大学教授 岸野 佑次

論文内容要旨

第 1 章では本論文の背景および目的を示した。近年、超高強度コンクリートおよび超高強度鉄筋の研究・開発が進み、コンクリートにおいてはシリカヒュームなどの混和材料の使用により圧縮強度が 100MPa を超えるものが実現可能となり、また鉄筋の場合、500~1000MPa に及ぶ降伏強度や引張強度を有する超高強度鉄筋の製造が可能となった。このような材料分野での技術進歩に伴い、各鉄筋コンクリート(RC)規準類においても、超高強度材料の使用が可能となる改訂が進められている。例えば 2002 年制定のコンクリート標準示方書構造性能照査編では、コンクリート圧縮強度の適用範囲を 80MPa まで拡張し、さらに、高強度コンクリートと高強度鉄筋の組合せを考慮して、コンクリート設計基準強度が 60MPa を超える RC 部材のせん断耐力を算定する際には、せん断補強鉄筋の設計降伏強度を 800MPa まで許容するようになった。このような超高強度材料を用いた RC 部材には、今後の労働力不足を補うための施工の合理化、省力化が図れるばかりでなく、利用空間の増大などが期待でき極めて魅力的である。

しかし、普通強度材料を用いた RC 部材に比べ、超高強度 RC 部材を対象とした実験的・解析的研究は、近年報告例が増加しているが、その曲げおよびせん断特性、さらには変形性能に関して十分に解明されていない。また、コンクリートおよび鉄筋の高強度化に伴い、両者の変形能が乏しくなるため、これら超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート部材は脆性的な破壊を引き起こしている。大地震を想定した耐震設計においては、地震エネルギーを部材降伏後の大きな塑性変形によって吸収することにより安全性を確保することが必要となるため、こうした超高強度材料を用いることによる部材の脆性化は、材料強度の増加の利点を生かすことができない結果となってきた。なお、RC はりのウェブ部に斜め方向に発達するひび割れが先行するせん断破壊は、鉄筋降伏先行型の曲げモーメントによる破壊型に比べて、靱性確保並びに安全性の立場から望ましくない破壊である。また、超高強度鉄筋コンクリート部材のせん断耐力を精度良く評価することが可能になり、塑性変形を期待する曲げ破壊型部材の供試体を設計する際の極めて有用な知見を得ることができた。しかし、現行の各設計規準では、普通強度 RC 部材に比べ安全性の余裕度を大きく確保するための安全係数や材料強度に上限値を設けているが、十分な精度を有するせん断耐力算定法は提示されていない。

こうした観点から、本研究ではコンクリート圧縮強度 100MPa、鉄筋降伏強度 1000MPa を超える超高強度材料を用いた RC 部材の実用化を目指した研究を行っており、その一環としてはせん断補強鉄筋のない超高強度 RC はりのせん断挙動の解明を目的としたせん断実験を実施した。また、実施した実験結

果 40 体に加え、既往のせん断補強鉄筋のない超高強度 RC はり実験結果 87 体も収集し、コンクリート圧縮強度 130MPa までを用いたせん断補強鉄筋のない RC はりのせん断耐力式を提案した。さらに、提案したせん断補強鉄筋のない超高強度 RC はりのせん断耐力式を基にし、また既往のせん断補強鉄筋を有する普通強度から超高強度 RC はりのせん断実験結果 178 体を収集し、解析することで、コンクリート圧縮強度 130MPa・せん断補強鉄筋強度 1200MPa まで適用可能なせん断耐力算定式を提示した。

第 2 章ではこの研究を行うに当たって基本となるべき項目および参考にした既往の研究の紹介と問題点について述べる。

第 3 章では本研究で実施したせん断補強鉄筋のない超高強度 RC はりのせん断実験の詳細とその実験結果について述べる。そして、得られた実験結果に対し、せん断補強鉄筋のない超高強度 RC はりのせん断特性について考察する。

せん断実験から得られた荷重－変位関係および最大荷重時のひび割れ状況により、超高強度コンクリートを使用しても、普通強度 RC はりと同様に、せん断スパン比 2.5～3.0 がせん断圧縮破壊と斜め引張破壊の遷移帯であることが認められた。また、斜め引張破壊する超高強度 RC はりでは、せん断強度に及ぼすコンクリート圧縮強度の影響は、コンクリート圧縮強度が 60MPa 以上で頭打ちとなること、および寸法効果の影響が普通強度 RC はりよりも大きくなること、などが確認され、既往のせん断耐力算定式をそのまま超高強度 RC はりに適用することは危険側の評価を与える結果となった。一方、せん断圧縮破壊する超高強度 RC はりでは、既往のせん断耐力算定式により、各変動因子のせん断耐力に与える影響を偏りなく評価できることを示した。

第 4 章では前述した実験結果に加え、既往の国内外の実験結果を収集し、斜め引張破壊およびせん断圧縮破壊を生じる超高強度 RC はりのせん断耐力算定式を提示し、その算定式の実験結果に対する精度から、超高強度 RC はりの設計せん断耐力の評価に用いる部材係数も提案する。本研究では、国内外の実験結果 265 体を基に提案され、その精度が十分に認知されている二羽式のコンクリート圧縮強度の項($f_c^{1/3}$)および有効高さの項($d^{1/4}$)を修正することで、超高強度 RC はりのせん断強度式を提案することにした。 f_c および d の指数部を変数とした回帰分析を行い、全実験結果と提案式から得られるせん断強度の比の平均が 1.0 となるように定数を定めた結果、次式に示す斜め引張破壊する超高強度 RC はりのせん断耐力提案式を得た。

$$V_{c,1} = 0.66d^{-2/5} p_t^{1/3} [0.75 + 1.4/(a/d)] \cdot b_w d$$

ここに、 d ：有効高さ(m)、 p_t ：引張鉄筋比(%), a/d ：せん断スパン比、 b_w ：ウェブ幅。

提案式を用いることにより、各因子に関し、特別な精度の偏りは生じず、二羽式のコンクリート圧縮強度および有効高さの項を超高強度 RC はりに適用した際に生じた問題点を改善できている。また、(実験値)/(提案式による算定値)の平均は 1.01、変動係数は 18.3%となることを確認した。

なお、本研究では、提案式を超高強度 RC はりに適用する際に用いるべき部材係数は、普通強度 RC はりに適用する際に部材係数 1.3 を用いることにより確保されている pfk (実強度を上回る設計せん断強度を算定する確率)の値を満足するように決定する。これは、信頼性設計における安全性基準(許容破壊確率)をキャリブレーションに基づき設定する考えと同じである。ここでは、確率変数 $x = (\text{実験値})/(\text{算定値})$ が正規分布に従うとし、提案式に用いる部材係数を算定する。その結果、超高強度材料を用いた RC はりの設計せん断耐力算定式を算定する際には、(実験値)/(算定値)の変動係数が大きくなることを考慮し、かなり大きな部材係数 2.18 で除す必要があることが確認された。

第 5 章では既往の研究をもとに、コンクリート圧縮強度が 130MPa、せん断補強鉄筋降伏強度が 1200MPa までを用いた RC はりのせん断耐力式を構築する。特に、修正圧縮場理論により、材料強度や

せん断補強鉄筋量によるせん断補強鉄筋負担せん断耐力 V_s の変化を解析的に評価することで、広範な材料強度の組合せからなる RC はりのせん断耐力の算定を可能にする。

本研究で解析対象とする供試体のコンクリート圧縮強度は、20MPa~130MPa に分布することから、修正圧縮場理論を用いる際に、コンクリートの主圧縮応力と主圧縮ひずみの関係、コンクリートのヤング係数およびコンクリートのひび割れ発生応力は普通強度から超高強度コンクリートまで適用可能な式に変更した。

収集した普通強度から超高強度コンクリートまで全 178 件に対し、修正圧縮場理論を用いて得られる(実験値)/(解析値)は平均 1.02、変動係数 20.7%であり、普通強度から超高強度 RC はりに対して精度良く実験結果を再見できることが確認された。せん断補強鉄筋の平均応力 $f_{v,m}$ と主圧縮応力の傾き θ_m は、全 178 体の解析結果に対する回帰分析により、以下の簡便な算定式を導出した。

$$V_s = \frac{A_w f_{v,m}}{s} j d \cdot \cot \theta_m$$

$$\text{ここに, } f_{v,m} = \min \left[160 \left(\frac{f'_c}{p_w} \right), 70 f_c^{3/5} \right] \leq f_{wy}, \quad \theta_m = \frac{3}{5} p_w^{1/6} \left(\frac{f_{v,m}}{f'_c} \right)^{1/4} \left(\frac{s}{d} \right)^{1/25} \quad (\text{単位: rad})$$

ここで p_w はせん断補強鉄筋比(%), f_{wy} はせん断補強鉄筋降伏強度(MPa), s はせん断補強鉄筋間隔。

最小せん断補強鉄筋量を含む供試体では、コンクリート圧縮強度の増加はそのせん断耐力の増加に寄与、また、せん断補強鉄筋に高強度鉄筋を使用した供試体では、せん断補強鉄筋の平均応力も最大せん断力時に降伏強度に達していないことが報告されており、従来のコンクリート圧縮強度の大きさに関らずせん断補強鉄筋の降伏と圧縮斜材角 45 度を仮定する V_s 算定式ではその傾向は捉えられない。これに対し、導出された上記の V_s 算定式を用いることで、それら影響を偏りなく反映できることを確認された。

せん断補強鉄筋を有する RC はりでは、せん断補強鉄筋の存在により、斜めひび割れの発生直後に破壊とはならず、その後も第 2, 第 3 の斜めひび割れが発生し荷重が増加する。そのため、せん断補強鉄筋のない高強度 RC はりで生じるひび割れの局所化の影響は小さくなり、結果として超高強度 RC はりの寸法効果を普通強度 RC はりと同じく $d^{1/4}$ で評価しても、危険側の結果を与えなかったと推察される。そこで、せん断補強鉄筋のない全 80 体の超高強度 RC はりに対して第 4 章で提案した V_c 算定式を再評価した。さらに、二羽式は、コンクリート圧縮強度が 66MPa までの実験供試体を基に回帰されていることから、二羽式のコンクリート圧縮強度の上限値を 64MPa とすると、せん断補強鉄筋のないせん断耐力算定式はコンクリート圧縮強度の大きさに関らず次式の評価式で算定できることを示した。

$$V_{c,2} = f_{vc} d^{-1/4} p_t^{1/3} [0.75 + 1.4/(a/d)] \cdot b_w d$$

$$\text{ここに, } f_{vc} = 0.2 f_c^{1/3} \leq 0.8$$

以上より、本章にて提示した $V_{c,2}$ と V_s の和により、普通強度から超高強度 RC はりまで適用可能なせん断耐力算定式とする。

現行のコンクリート標準示方書式(JSCE 式)は、実験結果を安全側に評価しており、これを部材係数で除した値が実験値を上回る危険度は非常に小さく設定されていることが確認される。ただし、コンクリート圧縮強度が大きくなるにつれ、(実験値)/(算定値(JSCE 式))は増加傾向にあり、結果として、102 体の超高強度 RC はりに対する(実験値)/(算定値)の平均値(1.51)は 76 体の普通強度 RC はりの平均値(1.20)に比べかなり大きくなっている。収集した全 178 体に対し、(実験値)/(提案式による算定値)は、平均 1.11、変動係数 15.3%を認められた。

第 6 章では、本研究全体を通して得られた結論である。

論文審査結果の要旨

近年、超高強度コンクリートおよび超高強度鉄筋の研究・開発が進み、土木構造物に対する実用化が検討されつつある。本研究では、これらの超高強度材料を用いた RC はり部材のせん断実験を実施することで、コンクリート圧縮強度 130MPa、せん断補強鉄筋強度 1200MPa までの広範囲な材料強度の組合せからなる RC はりに適用可能なせん断耐力算定式の構築を目的としており、全 6 章からなる。

第 1 章では本論文の背景および目的を示している。

第 2 章では、まず、各種強度のコンクリートと鉄筋の材料特性およびせん断補強鉄筋のない RC はりとせん断補強鉄筋を有する RC はり部材のせん断挙動に関する既往の研究を示した。せん断耐力評価の理論的手法、経験的手法および現行のせん断耐力算定式をまとめ、これらの既往の研究に関する問題点について論じた。

第 3 章では、本研究で行われたせん断補強鉄筋のない超高強度 RC はりのせん断実験の詳細およびその実験結果を示した。そして、全実験結果に対し、せん断補強鉄筋のない超高強度 RC はりのせん断特性について考察し、斜めひび割れ発生荷重やせん断耐力等に及ぼす各変動因子の影響を評価した。

第 4 章では、前述した実験結果に加え、国内外の既往の実験結果を多数収集し、斜め引張破壊およびせん断圧縮破壊を生じる超高強度 RC はりのせん断耐力算定式を提案した。また、その算定式の実験結果に対する精度および現行示方書におけるせん断設計式の有する危険度とを考慮して、本提案式を用いた場合に適用する部材係数を提示した。提案式およびこの部材係数を用いることにより超高強度材料を用いた場合も普通強度材料を用いた場合と同一の安全性を有するようになる。これらは実用上極めて有用な成果である。

第 5 章では、既往の研究を基に、せん断補強鉄筋の影響を考慮したコンクリート圧縮強度が 130MPa、せん断補強鉄筋降伏強度が 1200MPa までの材料を用いた RC はりのせん断耐力式を構築した。コンクリートの主圧縮応力と主圧縮ひずみの関係、コンクリートのヤング係数およびコンクリートのひび割れ発生応力を普通強度から超高強度コンクリートまで適用可能な式に変更した修正圧縮場理論により、材料強度やせん断補強鉄筋量によるせん断耐力の変化を解析的に評価することで、広範囲な材料強度の組合せからなる RC はりのせん断耐力の算定を可能となることを確認した。さらに、現行の設計手法と同様の簡便な計算によるせん断耐力算定式を提示した。これも実用上極めて有用な成果である。

第 6 章では、本論文の結論を示した。

以上要するに本論文は、超高強度材料を用いた RC はりの実験を行い、実験的・解析的検討から、超高強度材料を用いた RC はり部材のせん断設計法の提案を行ったものであり、コンクリート圧縮強度 80MPa までを対象とする土木学会コンクリート標準示方書の棒部材の設計せん断耐力式をコンクリート圧縮強度 130MPa まで適用可能とするように拡張した点に大きな特徴を有するものである。また、本論文に示された実験資料、およびせん断耐力算定法は今後のコンクリート構造の設計法の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。